

УДК 577.1+577.41+577.115

## ОЦЕНКА СТАБИЛЬНОСТИ ЖИРНОКИСЛОТНОГО СОСТАВА ОСНОВНЫХ МЕМБРАННЫХ ЛИПИДОВ МИДИИ ГРЕЯ *CRENOMYTILUS GRAYANUS* (DUNKER, 1853) (BIVALVIA: MYTILIDAE) В УСЛОВИЯХ ХРОНИЧЕСКОГО АНТРОПОГЕННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ

© 2019 г. Н. Н. Ковалев<sup>1,3,\*</sup>, Э. Я. Костецкий<sup>1</sup>, П. В. Веланский<sup>1,2</sup>,  
В. Я. Кавун<sup>2</sup>, О. В. Подгурская<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Дальневосточный федеральный университет,  
Владивосток 690950, Россия

<sup>2</sup>Национальный научный центр морской биологии им. А.В. Жирмунского (ННМЦБ) ДВО РАН,  
Владивосток 690041, Россия

<sup>3</sup>Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет,  
Владивосток 690087, Россия

\*e-mail: kovalevnn61@yandex.ru

Поступила в редакцию 06.06.2018 г.

После доработки 15.07.2018 г.

Принята к публикации 18.10.2018 г.

Исследовано накопление тяжелых металлов и его влияние на состав жирных кислот и молекулярных видов фосфатидилхолина (ФХ) и фосфатидилэтаноламина (ФЭ) в органах и тканях мидии Грея из чистых и загрязненных акваторий зал. Петра Великого Японского моря. Для оценки общей нагрузки аккумулированных тяжелых металлов в организме мидий использовали суммарный коэффициент концентрации ( $\Sigma$ КК), который у моллюсков из загрязненного района оказался экстремально высоким для всех исследованных органов. Основная доля в общей нагрузке принадлежала Си и Рб. Установлено, что накопление тяжелых металлов в почках, жабрах и мышцах не оказывало влияния на состав жирных кислот, а также молекулярных видов и форм основных мембранных липидов ФХ и ФЭ. Показана высокая устойчивость липидов мембран мидии Грея к хроническому антропогенному загрязнению тяжелыми металлами, позволяющая им функционировать в подобных условиях.

**Ключевые слова:** мидия Грея, тяжелые металлы, адаптация, фосфатидилхолин, фосфатидилэтаноламин, жирные кислоты, молекулярные виды и формы фосфатидилхолина и фосфатидилэтаноламина

DOI: 10.1134/S0134347519020050

В природе организмы подвергаются стрессам, вызванным загрязнением их среды обитания тяжелыми металлами, нефтепродуктами, фенолами и другими факторами, действие которых на живой организм часто трудно дифференцировать. К таким воздействиям особенно чувствителен липидный состав мембран пойкилотермных организмов (Filimonova et al., 2016; Silva et al., 2017). Одним из основных механизмов биохимической адаптации организмов к воздействию различных факторов окружающей среды является модификация липидов клеточных мембран (Хочачка, Сомеро, 1988). Изменения в структурной организации липидов способствуют стабилизации мембран, что обеспечивает нормальное функционирование ионных каналов, ферментов и рецепторов. Изменения в липидном составе мембран под действием фак-

торов среды возвращают физическое состояние мембран к дострессовому уровню. Основным компенсаторным ответом на стресс является изменение степени ненасыщенности жирных кислот фосфолипидов (Los, Murata, 2004). В результате исследования влияния алюминия и солей железа в водной среде на содержание фосфолипидов, холестерина и жирных кислот в личинках ручейника *Hydropsyche contubernalis* (Trichoptera) при отсутствии летальных исходов отмечено изменение значения молярного соотношения холестерин–фосфолипиды, что свидетельствовало о попытках переключить адаптационные биохимические механизмы для стабилизации клеточных структур (Regerand et al., 2005). Однако в полнофакторном эксперименте с использованием широкого диапазона концентраций свинца в жаберной

ткани мидии *Mytilus edulis* не выявлено существенного влияния металла на состав основных жирных кислот полярных липидов, а также повреждения мембран в условиях постоянного перекисного окисления липидов (Thyring et al., 2015). В то же время ионы меди вызывали изменения в структурной асимметрии аминокислотных липидов в ущерб трансмембранной организации липидного матрикса синапсомембранных мембран у зрелого минтая *Theragra chalcogramma* на фоне процессов перекисного окисления липидов (Kuilenko et al., 2002). Накопление кадмия у мидии Грея *Crenomytilus grayanus* приводило к изменению кинетических параметров неспецифических фосфатаз пищеварительной железы, что, в свою очередь, снижало адаптационную способность фермента, хотя кадмий не является прямым ингибитором микросомного фермент-мембранного комплекса (Zakhartsev et al., 2000). В то же время накопление кадмия не влияло на состав липидов в микросомах жабр гребешка *Mizuhopecten yessoensis* (см.: Chelomin, Belcheva, 1991). При повышенных концентрациях ионов тяжелых металлов у металлорезистентных бактерий увеличивалась проницаемость цитоплазматической мембраны (Theuvenet et al., 1987), но роль фосфолипидов бактериальных мембран в этом процессе до сих пор не выяснена.

Результаты работ, приведенных выше, не дают однозначного ответа на вопрос, как воздействуют тяжелые металлы на мембранные липиды и ферменты живых систем, поэтому необходимы дополнительные исследования, и прежде всего в естественных условиях. Цель настоящей работы – изучение состава жирных кислот (ЖК) основных мембранных липидов, а также их молекулярных видов и форм в органах и тканях дальневосточной мидии Грея в условиях экстремального хронического загрязнения среды тяжелыми металлами.

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА

Для исследования был выбран двустворчатый моллюск мидия Грея *Crenomytilus grayanus*, живущий более 100 лет (Селин, Дуленина, 2012). Мидия Грея представляет собой подходящий объект для моделирования долговременных адаптаций морских организмов к повышенному поступлению токсикантов и широко используется в лабораторных и полевых исследованиях, связанных с биоаккумуляцией тяжелых металлов (Shulkin et al., 2003; Кавун, Шулькин, 2005; Кавун и др., 2011; Ковалев и др., 2016; Фадеева и др., 2016).

Исследования проводили в двух районах: станция 1 (фоновая) – акватория о-ва Рейнеке;

станция 2 – б. Горностаи, экстремально загрязненный участок зал. Петра Великого. Бухта Горностаи долгое время подвергалась антропогенному воздействию, на ее берегах с 1967 по 2010 г. находился полигон твердых бытовых отходов (ТБО) г. Владивостока. По результатам мониторинга за 2008–2009 гг. содержание металлов в донных отложениях бухты во много раз превышало допустимые концентрации, например, содержание Hg было превышено в 1.8 раза, Pb – в 29 раз, Zn – в 25, Cu – в 69, а Cr, Ni и Co – в 4.0, 3.3 и 1.5 раза соответственно. В поверхностном и придонном слоях бухты концентрация нефтепродуктов превышала ПДК в среднем в 5 раз, концентрация фенолов – в 2 раза (Яцук, Яцук, 2010; Бельчева и др., 2013). Мидий (по 10 экз. на каждой станции) отбирали в августе 2014 г. с глубины 5 м. Для анализа содержания тяжелых металлов у пяти равноразмерных особей (средняя длина  $10.5 \pm 1.2$  см), отобранных на каждой станции, брали почки, жабры, мускул и гемолимфу. Для липидного анализа у оставшихся пяти экземпляров брали почки, жабры и мускул. Органы сразу гомогенизировали в хлороформ-метаноле (2 : 1, по объему). Липидный экстракт получали по методу Фольча с соавторами (Folch et al., 1957) и стабилизировали антиоксидантом (0.1–0.05% 2,6-дитретбутил-н-крезола). Фосфатидилхолин (ФХ) и фосфатидилэтаноламин (ФЭ) выделяли и анализировали жирнокислотный состав и молекулярные виды этих соединений по ранее описанной методике (Костецкий и др., 2013). ЖК анализировали в виде метиловых эфиров. Анализ выполняли на газовом хроматографе Agilent 6890GC с пламенно-ионизационным детектором. Идентификацию ЖК проводили с помощью метода “углеродных чисел”. Содержание ЖК рассчитывали по результатам трех хроматограмм.

Аналитическое разделение молекулярных видов ФХ и ФЭ выполняли методом высокоэффективной жидкостной хроматографии на хроматографе Shimadzu-LC20 с масс-детектором LCMS-2010EV (Костецкий и др., 2014). Образцы индивидуальных фосфолипидов (ФЛ) перерастворяли в чистом метаноле. Для разделения использовали колонку Ascentis C18 (зернение 5 мкм, длина 25 см, диаметр 2.1 мм); температура – 45°C. Элюирование градиентное со скоростью 0.3 мл/мин, состав элюента (6 : 92 : 2 – 6 : 74 : 20, вода : метанол : изопропанол, по объему). Параметры масс-детектора: ионизация распылением в электрическом поле, режим детектирования положительных ионов; давление газа (азот) – 0.2 Мпа; напряжение на капилляре – 4.5 кВ; поток распыляющего газа (азот) – 1.5 л/мин; температура линии десольватации – 250°C; температура входного интерфейса – 280°C;

диапазон сканирования –  $m/z$  650–920 и  $m/z$  620–885 для ФХ и ФЭ соответственно. Для идентификации молекулярных видов дополнительно проводили разделение ФХ и ФЭ в режиме детектирования как положительных, так и отрицательных ионов с большей степенью фрагментации. Изменяли следующие параметры масс-детектора: напряжение на капилляре электроспрея составляло  $-4/+4.5$  кВ; постоянное напряжение на предварительном квадруполе (Q-агрег) составляло  $-80/+80$  В; диапазон сканирования –  $m/z$  180–1000. Содержание молекулярных видов фосфолипидов определяли по площади пиков хроматограмм по квазимолекулярным ионам  $[M + H]^+$ , соответствующим каждому молекулярному виду. Каждый образец анализировали трижды. Статистическую обработку проводили с помощью программы Microsoft Excel. Результаты измерений представлены в виде  $\bar{x} \pm s$ , где  $\bar{x}$  – среднее арифметическое значение,  $s$  – стандартное отклонение.

Концентрацию Fe, Zn, Cu, Cd, Mn, Pb и Ni в почках, жабрах, мускуле и гемолимфе определяли методом атомно-абсорбционной спектрофотометрии на приборах Shimadzu-6800F и Shimadzu-6800G. Контроль качества определений включал измерение концентраций металлов в используемых кислотах, дубликатах проб и сертифицированных образцах моллюсков (NBSSRM1566a и ERM-CE278k). Среднее отклонение от паспортных данных стандартных образцов составляло 3–5% для всех металлов. Средние значения анализируемых параметров и стандартное отклонение определяли с помощью пакета программ Excel. Достоверность различий между выборками определяли по критерию Манна–Уитни с помощью пакета программ Statistica.

Суммарный коэффициент концентрации (ΣКК) рассчитывали путем сложения коэффициентов концентраций (КК) исследованных металлов, которые, в свою очередь, рассчитывали по формуле:  $КК_{mc} = C_{mc}/C_{фон}$ , где  $C_{mc}$  – концентрация металла в тканях мидий из района исследования, а  $C_{фон}$  – концентрация этого металла в тканях моллюсков из контрольного района (Чернова, 2016).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенные ранее исследования показали, что экстремальный уровень загрязнения среды б. Горностай вызывал кардинальные изменения показателей клеточного метаболизма у обитавших там двустворчатых моллюсков. Так, высокий уровень накопления тяжелых металлов в органах и тканях мидии Грея из б. Горностай (в частно-

сти, Cu, Pb и Cd) приводил к подавлению синтеза металлотioneин-связывающих белков – основного механизма детоксикации тяжелых металлов у морских беспозвоночных. В результате в клетках органов мидий основная часть аккумулярованного кадмия была связана с цитоплазматическими высокомолекулярными белками, что является признаком токсикологического стресса (Подгурская, Кавун, 2005).

Как известно, нарушение процессов регуляции тяжелых металлов прямо или опосредованно вызывает гиперпродукцию оксидрадикалов (Erkal et al., 2001; Valko et al., 2005). В органах мидий из б. Горностай обнаружена повышенная активность антиоксидантных ферментов: каталазы на 30–40% и глутатионпероксидазы на 80%. В то же время наблюдалось высокое содержание продуктов перекисного окисления липидов, в частности диеновых конъюгатов, что свидетельствовало о превышении защитного потенциала антиоксидантной системы мидий в условиях экстремально загрязненной б. Горностай. В свою очередь, это проявлялось в значительных повреждениях молекулы ДНК в жабрах мидий (Бельчева и др., 2013). Было также установлено, что холинэстеразная активность в гемолимфе мидий из этого района составляла всего 1.8% от таковой для фонового района. При этом данный фермент катализировал гидролиз только ацетилхолина, что позволяло говорить о подавлении холинэргических процессов (Ковалев и др., 2016). Исходя из вышесказанного, можно предположить, что такая нагрузка может существенно влиять и на состав жирных кислот мембранных липидов мидии Грея.

Анализ содержания Fe, Zn, Cu, Cd, Mn, Pb и Ni в почках мидий со станции 2 показал, что количество этих металлов было достоверно выше, чем у моллюсков с фоновой станции. Так, концентрации Cu и Pb соответственно в 17 и 320 раз превышали фоновые значения. Полученные данные согласуются с результатами предыдущих исследований, показавших, что Cu и Pb – это основные загрязнители б. Горностай (Shulkin et al., 2003). Закономерно, что максимальный коэффициент концентрации (КК), отражающий уровень суммарной нагрузки накопленных металлов на организм мидий, получен для почек (табл. 1), так как именно они являются основными органами хранения/выведения тяжелых металлов.

Тяжелые металлы поступают в организм моллюска в основном через жабры. В результате анализа установлено, что в жабрах *S. grayanus* со станции 2 были достоверно повышены концентрации Zn, Cu и Pb, а содержание Cd и Mn, наоборот, не достигало фоновых значений. Однако

**Таблица 1.** Средняя концентрация металлов в почках, жабрах, мускуле (мкг/г сухой массы) и гемолимфе (мкг/мл) мидии Грея и их суммарные коэффициенты концентрации (ΣКК)

Станция	Fe	Zn	Cu	Cd	Mn	Pb	Ni	(ΣКК)
Почки								
1	307 ± 98	1220 ± 198	8.6 ± 2.3	131 ± 27	5.9 ± 1.4	18 ± 6.0	11 ± 3.0	7
2	1113 ± 184*	4762 ± 815*	147 ± 50*	296 ± 88*	31 ± 14*	5730 ± 352*	191 ± 43*	367
Жабры								
1	225 ± 25	109 ± 7.0	9.1 ± 0.9	20.2 ± 5.3	10.3 ± 1.9	8.1 ± 1.5	2.3 ± 0.7	7
2	377 ± 169	272 ± 94*	448 ± 179*	14.9 ± 3.5*	2.5 ± 0.7*	233 ± 53*	2.7 ± 0.8	84
Мускул								
1	19 ± 5	38 ± 3	1.5 ± 0.1	0.4 ± 0.04	0.7 ± 0.05	0.4 ± 0.02	0.76 ± 0.31	7
2	71 ± 27*	38 ± 6	4.6 ± 1.8*	0.7 ± 0.2*	1.8 ± 0.1*	7.8 ± 3.5*	1.3 ± 0.3*	33
Гемолимфа								
1	0.20 ± 0.05	0.41 ± 0.02	0.10 ± 0.01	0.02 ± 0.003	0.09 ± 0.02	0.09 ± 0.03	0.14 ± 0.01	7
2	5.0 ± 1.80*	2.2 ± 0.11*	0.75 ± 0.04*	0.0035 ± 0.0002*	0.17 ± 0.009*	0.021 ± 0.001*	0.05 ± 0.003*	41

\*Значения достоверно (при  $p \leq 0.05$ ) отличаются от фонового уровня.

в почках моллюсков из загрязненного района уровень накопления данных металлов был повышен, что свидетельствовало об увеличенном поступлении Cd и Mn в организм животных. Вымывание кадмия и марганца при крайне высоком уровне накопления меди наблюдали ранее у двусторчатого моллюска *Modiolus modiolus* в эксперименте по пересадке, проведенном в б. Горностаи (Подгурская, Кавун, 2012).

Анализ содержания тяжелых металлов в мускуле мидий со станции 2 показал, что в этом органе было достоверно повышено содержание всех исследованных элементов, за исключением цинка (табл. 1). Крайне высоким был уровень накопления Fe, Cu и Pb. Значительное накопление данных элементов в мышечной ткани, не участвующей в хранении и в процессах биотрансформации металлов, свидетельствовало о существенном нарушении микроэлементного баланса. Это подтверждало и высокое значение КК (табл. 1).

Гемолимфа играет первостепенную роль в транспорте металлов. Поэтому в гемолимфе моллюсков со станции 2 концентрации всех исследованных элементов, за исключением свинца, были достоверно повышены (табл. 1). Свинец поступает в организм моллюска преимущественно в коллоидной форме и изолируется в лизосомальных гранулах (Regoli, Orlando, 1994). В растворенной форме этот элемент в организме моллюска практически не встречается, поэтому гемолимфа играет минимальную роль в его транспорте.

В ФХ из жабр, почек и мышц *C. grayanus* доминировали жирные кислоты 16:0 (от 17.9 до 22.4%), 20:5ω3 (от 14.8 до 19.3%) и 22:6ω3 (от 14.6 до 18.7%), а среди жирных спиртов (ЖС) преобладал 16:0 (от 3.3 до 6.6%). Содержание основных ЖК и ЖС в ФХ из органов мидий с обеих станций было сходным (табл. 2). Достоверные различия выявлены только в пяти из 15 ЖК и в одном из четырех ЖС почек. В органах мидий со станции 2 отмечено увеличение содержания насыщенных ЖК 16:0 (18.6 и 22.4%), моноеновых 16:1ω7 (2.7 и 3.9%), диеновых 18:2ω6 (0.8 и 1.3%) и полиеновых 18:4ω3 (1.0 и 1.4%) ЖК, а также снижение содержания полиеновых ЖК 22:6ω3 (18.0 и 14.6%), 22:5ω3 (2.0 и 1.4%) и ЖС 14:0 (2.0 и 1.5%). Однако при анализе суммарных показателей ненасыщенных, моноеновых и полиеновых ЖК достоверные различия в составе жирных радикалов (ЖР) в ФХ из почек мидий с разных станций не обнаружены (табл. 2).

В ФЭ из исследованных органов мидии Грея ЖК и жирные альдегиды (ЖА) содержались приблизительно в равном количестве и были распределены по жирным радикалам более равномерно, чем в ФХ (табл. 3). К основным ЖК ФЭ можно отнести кислоты 20:5ω3 (от 7.4 до 12.6%), 22:2НМР (от 8.8 до 10.2%) и 20:4ω6 (от 4.1 до 7.3%) (НМР – ЖК с нерегулярным расположением двойных связей); основные ЖА – 18:0 (от 14.1 до 19.5%) и 20:1 (7.4–10.5%). Как и в ФХ, основные ЖК ФЭ у мидий с обеих станций не различались, но их количественный состав в разных органах

**Таблица 2.** Состав жирных радикалов фосфатидилхолина в исследованных органах мидии Грея со станций 1 и 2

Жирные радикалы	Почки		Жабры		Мускул	
	станция 1	станция 2	станция 1	станция 2	станция 1	станция 2
Жирные кислоты						
14:0	0.8 ± 0.2	1.0 ± 0.2	0.9 ± 0.1	0.7 ± 0.1	1.7 ± 0.5	1.5 ± 0.3
15:0	0.7 ± 0.3	0.8 ± 0.1	0.7 ± 0.2	0.5 ± 0.1	1.0 ± 0.4	0.9 ± 0.2
16:0	18.6 ± 2.0	22.4 ± 0.8*	17.9 ± 1.7	19.3 ± 1.4	21 ± 1.8	21.1 ± 0.4
17:0	1.5 ± 0.0	1.3 ± 0.1	0.8 ± 0.1	0.7 ± 0.1	0.9 ± 0.0	0.9 ± 0.1
18:0	3.0 ± 1.1	2.2 ± 0.5	1.5 ± 0.2	1.4 ± 0.0	1.4 ± 0.3	1.5 ± 0.5
16:0 Δ2-ОН	2.9 ± 0.2	2.0 ± 0.6	1.7 ± 0.2	1.6 ± 0.4	1.9 ± 0.6	1.5 ± 0.1
16:1ω7	2.7 ± 0.1	3.9 ± 0.3*	2.9 ± 0.5	2.4 ± 0.3	4.4 ± 0.8	3.4 ± 0.2
18:1ω9	4.8 ± 0.3	5.3 ± 0.4	4.1 ± 0.2	4.4 ± 0.4	6.1 ± 0.5	6.4 ± 0.5
20:1ω9	2.0 ± 0.2	1.9 ± 0.2	4.8 ± 0.4	5.0 ± 0.3	2.1 ± 0.2	2.1 ± 0.2
20:1ω7	3.0 ± 0.7	2.9 ± 0.2	1.3 ± 0.2	1.4 ± 0.3	1.4 ± 0.2	1.8 ± 0.2
18:2ω6	0.8 ± 0.1	1.3 ± 0.1*	1.2 ± 0.1	1.2 ± 0.1	2.2 ± 0.2	2.2 ± 1.1
18:4ω3	1.0 ± 0.0	1.4 ± 0.2	1.1 ± 0.0	1.0 ± 0.2	2.2 ± 0.6	1.9 ± 0.0
20:4ω6	3.1 ± 0.3	3.7 ± 0.9	3.7 ± 0.6	4.3 ± 0.1	2.0 ± 0.3	2.9 ± 0.7
20:5ω3	18.8 ± 1.8	18.5 ± 1.8	18.2 ± 1.5	19.3 ± 2.1	15.1 ± 0.5	14.8 ± 1.7
22:5ω3	2.0 ± 0.01	1.4 ± 0.1*	2.3 ± 0.4	1.8 ± 0.2	1.6 ± 0.1	1.5 ± 0.2
22:6ω3	18.0 ± 2.8	14.6 ± 2.0*	16.7 ± 1.3	16.6 ± 2.9	17.1 ± 1.0	18.7 ± 0.3
Жирные спирты						
14:0	2.0 ± 0.0	1.5 ± 0.1	2.6 ± 0.2	2.3 ± 0.0	2.2 ± 0.4	2.2 ± 0.3
16:0	3.7 ± 0.4	3.3 ± 0.6	6.6 ± 1.5	6.6 ± 0.3	3.4 ± 0.8	3.8 ± 0.6
16:1	0.6 ± 0.0	0.5 ± 0.0	1.0 ± 0.1	1.0 ± 0.2	0.6 ± 0.1	0.7 ± 0.2
18:1	0.4 ± 0.0	0.3 ± 0.1	0.8 ± 0.2	1.0 ± 0.0	0.4 ± 0.1	0.4 ± 0.1
Сумма						
НЖР	35.8 ± 0.9	36.6 ± 0.2	35.8 ± 1.0	36.2 ± 0.6	35.8 ± 1.3	35.6 ± 0.0
МЖР	13.5 ± 0.7	14.3 ± 0.4	11.9 ± 1.1	12.0 ± 0.7	14.2 ± 1.3	13.8 ± 0.3
ПЖР	45.9 ± 0.5	44.4 ± 0.5	46.0 ± 0.9	46.8 ± 0.3	43.8 ± 0.4	45.2 ± 0.8

\*Значения достоверно (при  $p \leq 0.05$ ) отличаются от фонового уровня.

Примечание. НЖР, МЖР, ПЖР – соответственно насыщенные, мононенасыщенные и полиненасыщенные жирные радикалы. Содержание ЖР приведено в % от суммы ЖР в виде  $\pm s$ ,  $n = 3-7$ ,  $s$  – стандартное отклонение при  $p \leq 0.05$ . Радикалы, содержание которых во всех образцах было ниже 1%, не приведены, но учтены при расчете суммарных показателей.

варьировал. Достоверных различий в составе радикалов ФЭ в почках, жабрах и мускуле (как в индивидуальных, так и суммарных показателях) у мидий из чистой морской воды (станция 1) и из среды, хронически загрязненной тяжелыми металлами (станция 2), не обнаружено.

Известно, что главным механизмом поддержания функционального состояния мембран является изменение молекулярных форм ФЛ, содержащих НЖК, алкильные и алкенильные радика-

лы в  $sn-1$  и ПЖК в  $sn-2$  положении. Данный феномен характерен как для рыб, так и для морских беспозвоночных (Костецкий и др., 2014). Изменение молекулярных форм ФЛ может осуществляться разными способами. Три основные ЖК ФХ 16:0, 20:5ω3 и 22:6ω3 в исследованных органах мидии Грея формировали следующие главные молекулярные виды: 16:0/20:5, 16:0/22:6, 16:0a/22:6, 18:1/20:5, 16:0/20:4, 18:1/22:6 и 14:0a/22:6 (по убыванию их содержания, “a” – алкильные

**Таблица 3.** Состав жирных радикалов фосфатидилэтаноламина в исследованных органах мидии Грея со станций 1 и 2

Жирные радикалы	Почки		Жабры		Мускул	
	станция 1	станция 2	станция 1	станция 2	станция 1	станция 2
Жирные кислоты						
16:0	0.6 ± 0.3	1.1 ± 0.6	0.4 ± 0.1	0.4 ± 0.1	1.2 ± 0.3	1.4 ± 0.4
18:0	2.5 ± 0.3	2.6 ± 0.2	1.6 ± 0.3	2.0 ± 0.5	2.8 ± 0.6	3.5 ± 0.1
18:1ω9	0.5 ± 0.2	0.6 ± 0.2	0.5 ± 0.2	0.4 ± 0.1	1.5 ± 0.1	1.7 ± 0.1
18:1ω7	1.6 ± 0.2	1.7 ± 0.2	1.5 ± 0.2	1.6 ± 0.2	1.6 ± 0.2	1.6 ± 0.1
18:2ω6	1.3 ± 0.2	1.4 ± 0.2	1.2 ± 0.1	1.3 ± 0.2	1.5 ± 0.2	1.5 ± 0.2
18:4ω3	2.2 ± 0.1	2.1 ± 0.2	0.2 ± 0.1	0.2 ± 0.1	2.0 ± 0.1	2.1 ± 0.2
20:1ω11	1.0 ± 0.1	1.0 ± 0.1	2.6 ± 0.3	2.8 ± 0.3	2.3 ± 0.2	2.4 ± 0.3
20:1ω9	2.9 ± 0.6	2.8 ± 0.4	4.1 ± 0.6	3.7 ± 0.6	3.7 ± 0.5	3.8 ± 0.9
20:1ω7	2.4 ± 0.3	2.3 ± 0.2	3.6 ± 0.3	3.8 ± 0.4	3.6 ± 0.3	3.6 ± 0.2
20:2 НМР	3.4 ± 0.4	3.8 ± 0.5	7.2 ± 0.5	7.5 ± 0.2	4.0 ± 0.6	3.4 ± 1.2
22:2 НМР	9.9 ± 0.2	8.8 ± 1.4	10.2 ± 0.4	9.6 ± 0.3	9.1 ± 1.4	8.8 ± 1.4
20:3ω6	3.5 ± 0.7	3.2 ± 0.3	5.4 ± 0.1	5.8 ± 1.1	3.2 ± 0.2	3.2 ± 0.3
20:4ω6	5.8 ± 0.9	6.3 ± 1.3	4.1 ± 0.8	4.6 ± 0.2	5.5 ± 1.2	7.3 ± 2.8
20:5ω3	15.4 ± 0.1	14.8 ± 1.5	7.4 ± 1.1	7.4 ± 0.7	13.0 ± 0.7	12.6 ± 1.4
22:5ω3	1.1 ± 0.2	1.0 ± 0.1	1.50 ± 0.2	1.6 ± 0.2	0.6 ± 0.1	0.6 ± 0.1
22:6ω3	3.1 ± 0.6	3.5 ± 0.3	2.8 ± 0.7	3.4 ± 0.2	3.3 ± 0.4	3.8 ± 0.3
Жирные альдегиды						
16:0	2.1 ± 0.3	2.5 ± 0.2	3.1 ± 0.2	2.8 ± 0.3	2.7 ± 0.5	3.2 ± 0.4
17:0i	3.1 ± 0.5	3.4 ± 0.6	3.0 ± 0.1	3.1 ± 0.4	2.8 ± 0.4	3.0 ± 0.1
17:0	3.0 ± 0.5	2.8 ± 0.2	3.3 ± 0.1	3.0 ± 0.1	2.2 ± 0.1	2.2 ± 0.2
18:0i	1.6 ± 0.1	1.8 ± 0.3	1.0 ± 0.3	1.0 ± 0.3	1.7 ± 0.5	1.8 ± 0.3
18:0ai	1.8 ± 1.0	1.4 ± 0.2	1.2 ± 0.2	1.3 ± 0.2	1.4 ± 0.1	1.0 ± 0.3
18:0	16.2 ± 1.3	15.5 ± 0.8	19 ± 0.4	19.5 ± 1.5	14.5 ± 0.8	14.1 ± 0.5
18:1	3.1 ± 0.1	3.5 ± 0.1	4.2 ± 0.4	4.1 ± 1.0	4.0 ± 0.6	4.0 ± 1.1
20:1	10.5 ± 1.8	8.9 ± 0.5	7.8 ± 1.0	7.4 ± 0.5	9.2 ± 0.7	7.9 ± 1.9
Сумма						
НЖР	31.8 ± 1.4	32.1 ± 0.9	31.8 ± 1.4	32.1 ± 0.9	30.3 ± 1.3	31.5 ± 0.8
МЖР	17.2 ± 0.8	16.0 ± 0.2	17.2 ± 0.8	16.0 ± 0.2	18.8 ± 1.6	17.8 ± 1.6
ПЖР	43.9 ± 0.5	43.3 ± 0.9	43.9 ± 0.5	43.3 ± 0.9	41.7 ± 1.2	42.5 ± 1.1

Примечание. НМР – ЖК с нерегулярным расположением двойных связей; i, ai – разветвленные радикалы (iso и anteiso соответственно). Остальные обозначения, как в табл. 2.

**Таблица 4.** Состав молекулярных видов фосфатидилхолина в исследованных органах мидии Грея со станций 1 и 2

Молекулярные виды	Почки		Жабры		Мускул	
	станция 1	станция 2	станция 1	станция 2	станция 1	станция 2
16:0/16:1	2.7 ± 1.7	3.0 ± 0.4	1.5 ± 0.5	1.3 ± 0.5	2.3 ± 0.2	1.7 ± 0.2
16:0/18:1	0.7 ± 0.7	0.8 ± 0.1	0.3 ± 0.1	0.3 ± 0.1	1.6 ± 0.1	1.1 ± 0.4
16:0/18:2	0.7 ± 0.4	1.2 ± 0.1	0.8 ± 0.1	0.9 ± 0.2	1.9 ± 0.3	1.9 ± 1.1
16:0/20:2	0.7 ± 0.6	0.8 ± 0.1	0.4 ± 0.1	0.3 ± 0.1	1.0 ± 0.2	0.7 ± 0.0
14:0/20:5	0.5 ± 0.1	0.7 ± 0.2	0.6 ± 0.1	0.5 ± 0.0	1.0 ± 0.3	0.8 ± 0.0
14:0/22:6	0.6 ± 0.2	0.7 ± 0.1	0.6 ± 0.1	0.5 ± 0.0	1.6 ± 0.5	1.4 ± 0.3
15:0/22:6	0.6 ± 0.3	0.6 ± 0.1	0.6 ± 0.1	0.5 ± 0.0	0.9 ± 0.3	0.9 ± 0.2
16:0/18:3	0.5 ± 0.2	0.6 ± 0.1	0.4 ± 0.1	0.4 ± 0.1	1.2 ± 0.2	0.9 ± 0.1
16:0/18:4	0.9 ± 0.3	1.3 ± 0.4	0.7 ± 0.1	0.7 ± 0.1	2.5 ± 0.5	2.1 ± 0.2
16:0/20:4	2.7 ± 0.2	3.8 ± 0.2	3.8 ± 0.3	4.0 ± 0.1	2.9 ± 0.4	3.2 ± 0.6
16:0/20:5	12.7 ± 0.8	16.8 ± 0.9	15.4 ± 0.5	15.7 ± 0.8	12.8 ± 1.0	13.0 ± 1.1
16:0/22:5	1.4 ± 0.4	1.4 ± 0.1	1.9 ± 0.3	1.3 ± 0.1	1.7 ± 0.1	1.6 ± 0.3
16:0/22:6	11.4 ± 0.8	12.3 ± 0.6	10.7 ± 0.8	11.3 ± 0.3	13.2 ± 0.8	13.4 ± 0.6
17:0/20:5	1.5 ± 0.6	1.3 ± 0.0	0.8 ± 0.2	0.8 ± 0.1	0.6 ± 0.0	0.7 ± 0.2
18:0/20:5	3.6 ± 1.7	2.9 ± 0.9	1.9 ± 0.2	1.8 ± 0.1	1.8 ± 0.2	1.8 ± 0.4
16:1/20:5	0.6 ± 0.0	0.8 ± 0.1	1.0 ± 0.2	0.9 ± 0.0	0.9 ± 0.3	0.8 ± 0.0
16:1/22:6	0.7 ± 0.2	0.8 ± 0.1	1.2 ± 0.2	1.0 ± 0.2	1.5 ± 0.5	1.4 ± 0.2
18:1/20:4	0.7 ± 0.2	1.0 ± 0.4	0.7 ± 0.1	0.9 ± 0.1	0.8 ± 0.1	0.9 ± 0.3
18:1/20:5	3.5 ± 1.0	3.9 ± 0.1	3.7 ± 0.6	3.7 ± 0.3	3.9 ± 0.3	4.2 ± 0.1
18:1/22:6	2.1 ± 1.3	2.4 ± 0.5	2.0 ± 0.2	2.0 ± 0.1	3.2 ± 0.3	3.6 ± 0.1
20:1/20:4	0.6 ± 0.3	0.8 ± 0.2	0.4 ± 0.1	0.5 ± 0.0	0.2 ± 0.0	0.3 ± 0.1
20:1/20:5	2.8 ± 1.6	2.7 ± 0.5	1.3 ± 0.2	1.5 ± 0.3	1.3 ± 0.2	1.5 ± 0.4
20:1/22:6	0.7 ± 0.5	1.0 ± 0.1	0.4 ± 0.1	0.5 ± 0.1	0.6 ± 0.1	1.0 ± 0.2
16:0 Δ2-ОН/22:6	3.1 ± 0.7	2.0 ± 0.7	1.8 ± 0.2	1.7 ± 0.6	1.7 ± 0.4	1.4 ± 0.1
16:0 Δ2-ОН/22:2	1.0 ± 1.2	0.4 ± 0.2	0.2 ± 0.0	0.1 ± 0.0	0.2 ± 0.0	0.1 ± 0.0
14:0a/20:5	0.8 ± 0.2	0.6 ± 0.2	1.2 ± 0.1	1.0 ± 0.4	0.8 ± 0.1	0.6 ± 0.0
14:0a/22:6	2.3 ± 0.2	1.5 ± 0.1	2.9 ± 0.4	2.7 ± 0.6	2.7 ± 0.3	2.8 ± 0.3
16:0a/20:5	2.6 ± 0.7	2.3 ± 0.8	4.1 ± 0.4	4.3 ± 1.1	1.6 ± 0.3	1.6 ± 0.2
16:0a/20:4	0.5 ± 0.2	0.5 ± 0.0	1.1 ± 0.5	1.2 ± 0.1	0.3 ± 0.1	0.3 ± 0.1
16:0a/22:6	3.0 ± 0.2	2.3 ± 0.0	5.2 ± 1.6	5.0 ± 1.7	3.2 ± 0.7	4.0 ± 0.9
16:0a/22:5	0.6 ± 0.1	0.4 ± 0.1	1.0 ± 0.4	0.9 ± 0.4	0.4 ± 0.1	0.4 ± 0.0
16:1a/22:6	0.8 ± 0.1	0.6 ± 0.1	1.4 ± 0.2	1.4 ± 0.5	0.8 ± 0.2	1.1 ± 0.3
18:1a/20:5	0.5 ± 0.1	0.4 ± 0.2	1.0 ± 0.3	1.1 ± 0.3	0.4 ± 0.1	0.3 ± 0.1
18:2a/22:6	1.7 ± 0.3	1.1 ± 0.4	1.5 ± 0.8	1.4 ± 0.6	1.8 ± 0.6	1.1 ± 0.3
Молекулярные формы ФХ						
Диацил-ФХ	75.1 ± 1.3	79.4 ± 1.0	64.9 ± 3.2	64.4 ± 3.5	75.0 ± 5.0	75.5 ± 1.5
Алкилацил-ФХ	18.1 ± 0.9	14.4 ± 0.8	28.9 ± 2.8	28.6 ± 2.5	17.9 ± 0.4	17.9 ± 0.3
Алкенилацил-ФХ	1.2 ± 0.2	0.9 ± 0.2	1.4 ± 0.2	1.5 ± 0.3	0.9 ± 0.1	0.9 ± 0.1
НЖР/НЖР	0.5 ± 0.1	0.7 ± 0.2	0.8 ± 0.3	0.7 ± 0.4	0.4 ± 0.0	0.3 ± 0.0
НЖР/МЖР	3.5 ± 0.4	5.8 ± 0.6	3.3 ± 0.9	3.4 ± 0.9	6.2 ± 0.4	4.3 ± 0.4
НЖР/ПЖР	67.0 ± 1.8	66.0 ± 0.6	68.9 ± 1.5	68.5 ± 0.3	64.3 ± 3.0	66.0 ± 0.6
МЖР/МЖР	0.8 ± 0.2	1.3 ± 0.1	0.6 ± 0.2	0.5 ± 0.1	1.6 ± 0.3	1.2 ± 0.2
МЖР/ПЖР	20.2 ± 0.8	19.1 ± 0.5	18.9 ± 0.8	19.6 ± 0.1	19.6 ± 1.7	20.5 ± 0.0
ПЖР/ПЖР	2.3 ± 0.0	1.8 ± 0.4	2.9 ± 0.8	2.7 ± 0.4	2.7 ± 1.0	2.0 ± 0.5
X/X	5.7 ± 0.6	5.4 ± 0.3	4.8 ± 0.6	5.5 ± 0.8	5.2 ± 0.8	5.7 ± 0.5

Примечание. Значения приведены в % от суммы всех молекулярных видов в виде  $\bar{x} \pm s$ ,  $n = 3-7$ ,  $s$  – стандартное отклонение для  $P = 0.05$ . “а” – алкилацильные, “р” – алкенилацильные (плазмалогенные) формы. Молекулярные виды, содержание которых ни в одном из образцов не превышало 3%, не приведены, но учтены при расчете суммарных показателей. X/X – неидентифицированные молекулярные виды.

**Таблица 5.** Состав молекулярных видов фосфатидилэтаноламина в исследованных органах мидии Грея со станций 1 и 2

Молекулярные виды	Почки		Жабры		Мускул	
	станция 1	станция 2	станция 1	станция 2	станция 1	станция 2
16:0/20:5	0.5 ± 0.3	0.7 ± 0.1	0.3 ± 0.1	0.3 ± 0.0	1.4 ± 0.4	1.4 ± 0.4
18:0/20:4	0.7 ± 0.2	0.8 ± 0.2	0.3 ± 0.1	0.3 ± 0.1	0.7 ± 0.2	1.1 ± 0.4
18:0/20:5	1.8 ± 0.5	2.1 ± 0.4	0.7 ± 0.1	0.7 ± 0.0	2.9 ± 0.5	3.2 ± 0.5
18:0/22:6	2.3 ± 0.1	1.8 ± 0.2	1.9 ± 0.5	2.7 ± 1.1	1.6 ± 0.4	2.4 ± 1.0
18:1/20:5	0.3 ± 0.2	0.3 ± 0.0	0.2 ± 0.1	0.2 ± 0.1	1.1 ± 0.2	1.2 ± 0.1
20:1/20:5	0.5 ± 0.1	0.6 ± 0.1	0.1 ± 0.0	0.1 ± 0.1	1.1 ± 0.5	1.3 ± 0.0
16:0p/20:1	0.4 ± 0.1	0.4 ± 0.1	1.0 ± 0.1	0.7 ± 0.2	0.8 ± 0.2	0.8 ± 0.1
18:0p/20:1	1.3 ± 0.2	1.2 ± 0.2	2.5 ± 0.6	2.0 ± 0.4	1.2 ± 0.2	1.3 ± 0.6
16:0p/20:2	1.0 ± 0.2	1.2 ± 0.3	1.6 ± 0.1	1.3 ± 0.1	1.9 ± 0.2	2.4 ± 0.4
16:0p/22:2	1.1 ± 1.1	1.4 ± 0.1	1.7 ± 0.5	1.9 ± 0.0	1.1 ± 0.4	1.2 ± 0.2
17:0p/20:2	1.2 ± 0.2	1.1 ± 0.2	1.5 ± 0.1	1.2 ± 0.1	1.0 ± 0.1	0.8 ± 0.0
17:0p/22:2	0.5 ± 0.2	0.5 ± 0.0	1.3 ± 0.3	1.1 ± 0.2	0.5 ± 0.1	0.4 ± 0.2
17:0p/20:4	0.9 ± 0.0	0.9 ± 0.3	0.7 ± 0.1	0.7 ± 0.1	0.5 ± 0.1	0.7 ± 0.3
17:0p/20:5	1.6 ± 0.3	1.5 ± 0.2	0.9 ± 0.2	0.9 ± 0.2	0.9 ± 0.1	0.9 ± 0.3
17:0ip/20:2	2.0 ± 0.3	1.9 ± 0.3	1.7 ± 0.4	1.6 ± 0.1	1.5 ± 0.2	1.6 ± 0.0
17:0ip/22:2	0.5 ± 0.2	0.5 ± 0.1	0.8 ± 0.4	0.9 ± 0.4	0.6 ± 0.2	0.6 ± 0.2
17:0ip/20:/3	0.6 ± 0.2	0.6 ± 0.1	0.7 ± 0.0	0.9 ± 0.3	0.5 ± 0.1	0.6 ± 0.0
17:0ip/20:4	0.8 ± 0.1	0.9 ± 0.4	0.6 ± 0.0	0.7 ± 0.1	0.6 ± 0.2	0.8 ± 0.3
17:0ip/20:5	1.2 ± 0.3	1.5 ± 0.4	0.8 ± 0.1	0.9 ± 0.1	1.0 ± 0.2	1.0 ± 0.2
18:0p/20:2	5.9 ± 0.5	5.5 ± 1.1	8.4 ± 0.8	8.1 ± 0.6	5.7 ± 0.6	4.8 ± 0.8
18:0p/22:2	2.3 ± 0.0	2.5 ± 0.6	6.3 ± 0.2	6.5 ± 0.7	2.5 ± 0.2	2.1 ± 0.9
18:0p/20:3	3.2 ± 0.6	2.8 ± 0.3	5.9 ± 0.1	6.2 ± 1.7	3.0 ± 0.2	2.9 ± 0.0
18:0p/22:3	0.9 ± 0.5	0.8 ± 0.2	1.9 ± 0.1	2.0 ± 0.2	0.9 ± 0.1	0.7 ± 0.3
18:0p/20:4	4.3 ± 1.1	4.4 ± 0.9	3.5 ± 0.8	3.8 ± 0.7	3.8 ± 1.1	4.8 ± 2.0
18:0p/22:4	0.5 ± 0.0	0.5 ± 0.1	0.8 ± 0.3	0.8 ± 0.2	0.6 ± 0.1	0.7 ± 0.1
18:0p/20:5	11.9 ± 1.5	10.7 ± 1.9	6.1 ± 1.0	6.3 ± 0.0	7.9 ± 0.5	7.7 ± 1.1
18:0p/22:6	1.4 ± 0.3	1.7 ± 0.1	1.7 ± 0.4	1.9 ± 0.4	1.6 ± 0.2	1.4 ± 0.3
18:0ip/20:2	1.3 ± 0.2	1.3 ± 0.2	0.7 ± 0.3	0.7 ± 0.6	1.3 ± 0.9	1.6 ± 0.9
18:0ip/20:5	0.8 ± 0.3	0.9 ± 0.4	0.5 ± 0.1	0.3 ± 0.1	0.8 ± 0.5	0.6 ± 0.1
18:0aip/20:2	—	0.5 ± 0.1	0.7 ± 0.4	0.8 ± 0.1	0.5 ± 0.1	0.3 ± 0.3
18:0aip/22:3	0.6 ± 0.2	0.6 ± 0.1	0.8 ± 0.3	0.7 ± 0.3	0.8 ± 0.1	0.3 ± 0.1
18:0aip/20:5	1.7 ± 0.4	1.4 ± 0.5	0.6 ± 0.2	0.7 ± 0.0	0.9 ± 0.1	0.8 ± 0.2
18:1p/20:1	0.4 ± 0.1	0.5 ± 0.1	1.4 ± 0.4	1.0 ± 0.9	0.9 ± 0.8	0.4 ± 0.6
20:1p/20:1	1.4 ± 0.2	1.2 ± 0.1	2.2 ± 0.7	1.9 ± 0.3	1.6 ± 0.5	1.5 ± 1.1
18:1p/20:2	2.0 ± 0.0	2.1 ± 0.2	2.3 ± 0.2	2.3 ± 0.1	2.2 ± 0.4	2.3 ± 0.2
18:1p/22:2	0.9 ± 0.1	0.9 ± 0.0	1.7 ± 0.2	1.8 ± 0.4	1.0 ± 0.2	0.8 ± 0.1
18:1p/20:4	0.5 ± 0.2	0.7 ± 0.0	0.6 ± 0.3	0.8 ± 0.3	0.6 ± 0.3	1.1 ± 0.8
18:1p/20:5	1.5 ± 0.1	1.7 ± 0.3	1.0 ± 0.1	1.0 ± 0.4	1.2 ± 0.2	1.2 ± 0.4
20:1p/20:2	5.1 ± 1.4	4.8 ± 1.0	3.1 ± 0.4	2.9 ± 0.3	3.8 ± 0.8	3.5 ± 1.3
20:1p/22:2	1.3 ± 0.2	1.2 ± 0.2	2.3 ± 0.4	2.4 ± 0.4	1.6 ± 0.4	1.1 ± 0.6
20:1p/20:3	2.0 ± 0.4	1.7 ± 0.1	2.4 ± 0.4	2.3 ± 0.1	1.9 ± 0.3	1.6 ± 0.5
20:1p/20:4	2.4 ± 0.9	2.3 ± 0.5	1.3 ± 0.1	1.5 ± 0.1	2.2 ± 0.5	2.3 ± 0.3
20:1p/20:5	7.4 ± 1.4	6.9 ± 1.2	2.5 ± 0.4	2.4 ± 0.3	5.0 ± 0.1	4.7 ± 0.5



Таблица 5. Окончание

Молекулярные виды	Почки		Жабры		Мускул	
	станция 1	станция 2	станция 1	станция 2	станция 1	станция 2
Молекулярные формы ФЭ						
Диацил-ФЭ	10.2 ± 2.3	11.0 ± 2.5	5.8 ± 1.3	6.6 ± 0.4	15.7 ± 2.6	16.2 ± 0.5
Алкенилацил-ФЭ	83.7 ± 2.2	83.1 ± 2.0	86.2 ± 0.7	86.0 ± 1.1	76.2 ± 2.0	75.6 ± 0.1
НЖР/НЖР	0.1 ± 0.0	0.1 ± 0.0	0.2 ± 0.1	0.1 ± 0.0	0.1 ± 0.1	0.1 ± 0.0
НЖР/МЖР	3.3 ± 0.8	3.2 ± 0.4	5.9 ± 0.6	5.5 ± 0.2	4.2 ± 0.6	4.3 ± 1.3
НЖР/ПЖР	61.2 ± 1.9	61.9 ± 1.7	61.5 ± 2.7	62.4 ± 5.2	57.2 ± 2.9	58.5 ± 3.1
МЖР/МЖР	1.9 ± 0.3	1.8 ± 0.2	3.7 ± 0.9	3.9 ± 1.2	3.2 ± 1.3	2.6 ± 0.5
МЖР/ПЖР	27.2 ± 3.0	26.9 ± 0.5	21.1 ± 1.2	21.0 ± 2.1	27.0 ± 1.6	26.1 ± 0.8
ПЖР/ПЖР	0.2 ± 0.0	0.2 ± 0.0	0.2 ± 0.1	0.1 ± 0.1	0.2 ± 0.0	0.2 ± 0.0
X/X	6.1 ± 0.1	5.9 ± 1.9	7.0 ± 1.4	7.0 ± 1.5	8.1 ± 0.7	7.2 ± 0.4

Примечание. Обозначения, как в табл. 3 и 4.

радикалы) (табл. 3). Достоверных различий в молекулярных видах и формах ЖК ФХ в жабрах и мускуле мидий из разных местообитаний не обнаружено (табл. 4). Однако в почках моллюсков из фонового и загрязненного районов были выявлены достоверные различия в следующих молекулярных видах ФХ: 16:0/20:5 (12.7 и 16.8%), 16:0/20:4 (2.7 и 3.8%), 14:0a/22:6 (2.3 и 1.5%), 16:0a/22:6 (3.0 и 2.3%). Достоверные различия отмечены также в содержании диацил-ФХ (75.1 и 79.4%), алкилацил-ФХ (18.1 и 14.4%) и НЖК/МЖК ФХ (3.5 и 5.8%). Наиболее вероятно, что данные изменения в липидном составе почек связаны с максимальной нагрузкой аккумулированных токсиантов на эти органы (табл. 1).

В формировании молекулярных видов и форм ФЭ в почках, жабрах и мускуле мидии Грея самое активное участие принимают такие ЖК, как 22:2 НМР, 20:2НМР, 20:5ω3, 20:4ω6 и 20:3ω6, а также ЖА 18:0, 20:1 и 18:1 (табл. 3). Набор молекулярных видов ФЭ (43 вида, см. табл. 5) существенно отличается от такового ФХ (34 вида, табл. 4). Основными молекулярными видами ФЭ, в отличие от ФХ, являются алкенилацильные (плазмалогенные) формы. Достоверных различий в молекулярных видах и формах ФЭ в исследованных органах мидии Грея из фонового и загрязненного районов не обнаружено.

В системе теоретических проблем адаптации существенная роль принадлежит представлениям о состоянии структурных компонентов клеточных мембран в условиях контакта организма и среды. Очевидно, что механизмы адаптации направлены на сохранение функциональной и структурной целостности мембран в ответ на поражающее действие экстремальных факторов.

Выполненное нами исследование липидного состава жирных радикалов, а также молекулярных видов и форм ФХ и ФЭ в органах мидии Грея не выявило заметного воздействия долговременного загрязнения тяжелыми металлами на структуру фосфолипидов. Это служит подтверждением высокой устойчивости мембранных липидов, позволяющей клеткам функционировать в экстремальных условиях. Таким образом, полученные нами данные свидетельствуют об отсутствии существенных изменений в составе главных полярных липидов исследованных органов и тканей мидии Грея в условиях хронического антропогенного загрязнения.

Работа выполнена при поддержке РНФ (грант № 14-50-00034 “Технологии мониторинга и рационального использования морских биологических ресурсов”).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бельчева Н.Н., Истомина А.А., Слободскова В.В., Челомин В.П. Использование молекулярных биомаркеров окислительного стресса для оценки загрязнения морской среды // Вестн. МГОУ. Сер. “Естественные науки”. 2013. № 3. С. 87–92.
- Кавун В.Я., Шулькин В.М. Изменение микроэлементного состава органов и тканей двусторчатого моллюска *Crenomytilus grayanus* при акклиматизации в биотопе, хронически загрязненном тяжелыми металлами // Биол. моря. 2005. Т. 31. № 2. С. 123–128.
- Кавун В.Я., Чепкасова А.И., Подгурская О.В., Ковалев Н.Н. Адаптация холинэргической системы *Crenomytilus grayanus* (Bivalvia: Mytilidae) к импактным природным и антропогенным условиям // Изв. РАН. Сер. биологическая. 2011. № 2. С. 220–226.

- Ковалев Н.Н., Кавун В.Я., Костецкий Э.Я. и др. Холинэстеразная активность гемолимфы мидии *Crenomytilus grayanus* (Dunker, 1853) (Bivalvia: Mytilidae), обитающей в импактных природных и антропогенных условиях // Биол. моря. 2016. Т. 42. № 1. С. 41–47.
- Костецкий Э.Я., Веланский П.В., Санина Н.М. Фазовые переходы фосфолипидов как критерий оценки способности рыб к термоадаптации // Биол. моря. 2013. Т. 39. № 2. С. 136–143.
- Костецкий Э.Я., Санина Н.М., Веланский П.В. Термотропное поведение и состав главных молекулярных видов фосфолипидов иглокожих // Биол. моря. 2014. Т. 40. № 2. С. 143–151.
- Подгурская О.В., Кавун В.Я. Сравнительный анализ субклеточного распределения тяжелых металлов в органах митилид *Crenomytilus grayanus* и *Modiolus modiolus* в условиях хронического загрязнения // Биол. моря. 2005. Т. 31. № 6. С. 435–442.
- Подгурская О.В., Кавун В.Я. Оценка адаптационно-защитного потенциала двустворчатых моллюсков *Modiolus modiolus* (Linnaeus, 1758) и *Crenomytilus grayanus* (Dunker, 1853) в условиях повышенного содержания тяжелых металлов в среде // Биол. моря. 2012. Т. 38. № 2. С. 174–182.
- Селин Н.И., Дуленина П.А. Рост и продолжительность жизни мидии Грея *Crenomytilus grayanus* (Bivalvia: Mytilidae) в Татарском проливе Японского моря в связи с особенностями обитания у северной границы ареала // Биол. моря. 2012. Т. 38. № 4. С. 298–304.
- Фадеева Ю.И., Кавун В.Я., Слободскова В.В., Челомин В.П. Сравнительная оценка биодоступности наночастиц и ионов меди для мидии Грея *Crenomytilus grayanus* (Dunker, 1853) (Bivalvia: Mytilidae) в условиях лабораторного эксперимента // Вестн. биотехнологии и физико-химической биологии им. Ю.А. Овчинникова. 2016. Т. 12. № 3. С. 5–9.
- Хочачка П., Сомеро Дж. Биохимическая адаптация. М.: Мир. 1988. 568 с.
- Чернова Е.Н. Биогеохимический фон и особенности накопления металлов фукусовыми водорослями в прибрежных водах Японского, Охотского и Белого морей // Биол. моря. 2016. Т. 42. № 1. С. 60–68.
- Яцук А.В., Яцук А.В. Мониторинг загрязнения акватории Уссурийского залива в зоне влияния полигона твердых бытовых отходов г. Владивостока // Проблемы экологии морского шельфа: Материалы Всероссийск. науч. конф., 16–22 сентября 2010. Владивосток: ДВФУ. 2010. С. 201–203.
- Chelomin V.P., Belcheva N.N. Alterations of microsomal lipid synthesis in gill cells of bivalve mollusk *Mizuhopecten yessoensis* in response to cadmium accumulation // Comp. Biochem. Physiol. C: Pharmacol. Toxicol & Endocrinol. 1991. V. 99. № 1–2. P. 1–5.
- Erkal N., Gurer-Orhan H., Aykin-Burns N. Toxic metals and oxidative stress. Part I: mechanisms involved in metal-induced oxidative damage // Curr. Top. Med. Chem. 2001. V. 1. № 6. P. 529–539.
- Filimonova V., Goncalves F., Marques J.C. et al. Fatty acid profiling as bioindicator of chemical stress in marine organisms: A review // Ecol. Indic. 2016. V. 67. P. 657–672.
- Folch J., Lees M., Sloane-Stanley G.H. A simple method for the isolation and purification of total lipids from animal tissues // J. Biol. Chem. 1957. V. 226. № 1. P. 497–509.
- Kurilenko A.V., Zakhartsev M.V., Chelomin V.P. In vitro effect of copper ions on transbilayer distribution of aminophospholipids in synaptosomal membrane of walleye pollock (*Theragra chalcogramma*) // Aquat. Toxicol. 2002. V. 58. P. 131–136.
- Los D.A., Murata N. Membrane fluidity and its roles in the perception of environmental signals // Biochim. Biophys. Acta – Biomembr. 2004. V. 1666. № 1–2. P. 142–157.
- Regerand T.I., Nefedova Z.A., Nemova N.N. et al. Effect of Aluminum and Iron on lipid metabolism in aquatic invertebrates // Appl. Biochem. Microbiol. 2005. V. 41. № 2. P. 192–198.
- Regoli F., Orlando E. Accumulation and subcellular distribution of metals (Cu, Fe, Mn, Pb and Zn) in the Mediterranean mussel *Mytilus galloprovincialis* during a field transplant experiment // Mar. Pollut. Bull. 1994. V. 28. № 10. P. 592–600.
- Shulkin V.M., Kavun V.Ya., Presley B.J. Metal concentrations in mussel *Crenomytilus grayanus* and oyster *Crasostrea gigas* in relation to contamination of ambient sediments // Environ. Inter. 2003. V. 29. P. 493–502.
- Silva C.O., Simões T., Novais S.C. et al. Fatty acid profile of the sea snail *Gibbula umbilicalis* as a biomarker for coastal metal pollution // Sci. Total Environ. 2017. V. 586. P. 542–550.
- Theuvenet A.P.R., Kessels B.G.F., Blankensteijn W.M., Borst-Pawels G.W.F.H. A comparative study of K<sup>±</sup> loss from a cadmium-sensitive and a cadmium-resistant strain of *Saccharomyces cerevisiae* // FEMS Microbiol. Lett. 1987. V. 43. № 2. P. 147–153.
- Thyrring J., Juhl B.K., Holmstrup M. et al. Does acute lead (Pb) contamination influence membrane fatty acid composition and freeze tolerance in intertidal blue mussels in arctic Greenland? // Ecotoxicol. 2015. V. 24. P. 2036–2042.
- Valko M., Morris H., Cronin M.T.D. Metals, toxicity and oxidative stress // Curr. Med. Chem. 2005. V. 12. № 10. P. 1161–1208.
- Zakhartsev M.V., Chelomin V.P., Belcheva N.N. The adaptation of mussels *Crenomytilus grayanus* to cadmium accumulation result in alterations in organization of microsomal enzyme–membrane complex (non-specific phosphatase) // Aquat. Toxicol. 2000. V. 50. № 1–2. P. 39–49.

**Fatty Acid Composition of Major Membrane Lipids of the Mussel *Crenomytilus grayanus* (Dunker, 1853) (Bivalvia: Mytilidae) under Chronic Anthropogenic Pollution: Evaluation of the Stability**

**N. N. Kovalev<sup>a, c</sup>, E. Ya. Kostetsky<sup>a</sup>, P. V. Velansky<sup>a, b</sup>, V. Ya. Kavun<sup>b</sup>, and O. V. Podgurskaya<sup>b</sup>**

<sup>a</sup>*Far Eastern Federal University,  
Vladivostok 69095, Russia*

<sup>b</sup>*National Scientific Center of Marine Biology, Far Eastern Branch Russian Academy of Sciences,  
Vladivostok 690041, Russia*

<sup>c</sup>*Far Eastern State Technical Fisheries University,  
Vladivostok 690087, Russia*

The accumulation of heavy metals and their effect on the composition of fatty acids and molecular species of phosphatidylcholine (PC) and phosphatidyl ethanolamine (PE) has been studied in the molluscan organs and tissues of the Gray mussel from clean and polluted water areas of Peter the Great Bay of the Sea of Japan. The total load of heavy metals accumulated in mussel's organism was evaluated with the coefficient of total concentration coefficient ( $\Sigma CC$ ) which turned out to be extremely high for all the organs studied in mollusks from a polluted site. Cu and Pb accounted for the main share in the total load. It was found that accumulation of heavy metals in the kidneys, gills and muscles had no effect on the composition of fatty acids, molecular species, and forms of basic membrane lipids of PC and PE. It has been shown that high resistance of membrane lipids of the Gray mussel to chronic anthropogenic pollution with heavy metals allows the mussel's organism to function under conditions of sea contamination.

*Keywords:* Gray mussel, heavy metals, adaptation, phosphatidylcholine, phosphatidylethanolamine, fatty acids, molecular species and forms of phosphatidylcholine and phosphatidylethanolamine